1981—2020年陕西省暖季不同历时强降水时空变化特征

蔡新玲[1]， 蔡依晅[2]， 叶殿秀[3]， 李 茜[1]， 户元涛[1]， 胡 琳[1]

（1. 陕西省气候中心，陕西 西安 710014；2. 周至县应急管理局，陕西 西安 710400；
3. 国家气候中心，北京 100081）

摘 要：利用1981—2020年陕西省暖季（5—9月）95个国家气象观测站小时降水量资料，结合多种数理统计方法分析4个历时（1 h、3 h、6 h、12 h）强降水的时空变化。结果表明：（1）陕西省短历时强降水主要集中在7—8月，4个历时强降水高发区均位于陕南秦巴山区，稀发区位于关中平原中部和陕北长城沿线。（2）各历时降水极值的空间差异均较大，历时越短，极值分布的局地性越强。（3）近40 a，陕西省各历时强降水均呈增多增强趋势，尤以3 h强降水的增加最为显著。（4）各历时强降水的趋势变化在空间上表现为非均一性，陕北黄河沿线和陕南中南部强降水呈增多趋势，陕北南部和关中平原中部呈减少趋势，且历时越短，强降水呈增多趋势的范围越大。（5）强降水日变化南北不同，历时越短，强降水的日变化越明显，特别是陕北短历时强降水日变化最为突出，且在傍晚或夜间易发生强降水事件，其危害更大。

关 键 词：短历时强降水；变化趋势；时空分布；陕西省

文章编号：1000－6060(2025)01－0001－10(0001～0010)

大量研究表明气候变暖背景下极端强降水事件趋多趋强，其引发的灾害损失与影响也愈加严重[1-2]。例如，2010年8月8日甘肃省舟曲县短时强降水引发特大泥石流灾害，2012年7月21日北京市特大暴雨以及2021年7月20日郑州市特大暴雨洪涝灾害等。IPCC AR6指出随着全球变暖加剧，强降水事件很可能变得更强、更频繁[3]，强降水更倾向于在短时间尺度产生[4]。与一般的暴雨（日降水量≥50 mm）相比，短时强降水（小时降水量≥20 mm）具有降水效率高、致灾性强、预报难度大等特征[5]。因此，短时强降水天气的研究备受气象学者的关注。

近年，随着逐时降水资料的获取，针对短时强降水的时空演变及成因研究日趋深入，其分布呈现显著的区域性特征[6-9]。陈炯等[10]的分析表明中国短时强降水时次频率地理分布同暴雨分布非常相似，总体呈由东南向西北递减趋势，华南地区短时强降水天气最为活跃，西北地区短时强降水发生频率低，但有强度超过50 mm·h^{-1}的强降水。短时强降水主要由中尺度对流系统造成，局地性强，地形影响显著。王婧羽等[11]分析2010—2015年河南省加密自动站逐时降水资料，发现地形对降水的增幅作用显著，且主要通过增加短时强降水发生频次实现。冉津江等[12]利用2011—2020年加密自动站逐时降水资料分析指出，四川盆地短时强降水主要集中在西南部高山与盆地过渡区和西北部龙门山脉一带，强降水频次和降水量的变化呈增多趋势，且与盆地西北部地质灾害数量高度相关。地形不仅影响强降水空间分布，同时也影响降水日变化。受青藏高原大地形影响，四川省降水日变化呈显著的“夜雨”特征，且夜间强降水事件特征更加明显[13]。秦岭及周边地区暖季降水受地形影响南北部具有明显的昼夜反位相特征，午后黄土高原的昼雨多发生在秦岭北部[14]。不同短历时强降水可能由不同时间尺度天气系统造成，其时空分布也具有明显不同的特征。郭凌曜等[15]发现湖南省12 h强降水频次增多趋势较1 h、3 h显著。西北地区东部

收稿日期：2024-02-29； **修订日期**：2024-05-11
基金项目：秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室项目（2023K-4）；陕西省重点研发计划项目（2024SF-YBXM-559）资助
作者简介：蔡新玲（1969-），女，硕士研究生，正研级高工，主要从事气象灾害影响评估工作. E-mail: caixinling@126.com

6 h历时强降水的年际变化不大,但区域性的短时强降水过程呈明显的增长趋势[16]。苗爱梅等[17]通过分析1981—2018年逐时降水资料发现,山西省不同短历时强降水站次的年变化幅度很大,12 h内历时强降水年频次变化趋势具有南部增长速率高于北部,山区明显高于盆地的特点。

陕西省地处青藏高原东北部东亚季风影响边缘地带,从陕北黄土高原到关中平原,再到陕南秦巴山区,这种独特的地理位置、地形地貌及气候条件下,各地短历时强降水分布如何,与之对应的强降水频率及强度又有何差异,不同历时强降水又呈现怎样的日变化,这些问题都需要系统和深入地分析。目前,对陕西省短时强降水的研究主要侧重于环流特征、水汽和能量条件以及对流触发机制等天气学角度[18-20],为预报预警提供思路,但从气候学角度对短时强降水的时空分布以及日变化研究还很少[21-22],特别是针对不同短历时强降水极值、频次及其变化的研究还没有涉及。因此,本文利用逐时降水量,对1 h、3 h、6 h和12 h历时强降水进行统计和分析,掌握其时空变化特征及致灾特点,旨在为陕西省强降水的预测预警和气象灾害防御提供参考。

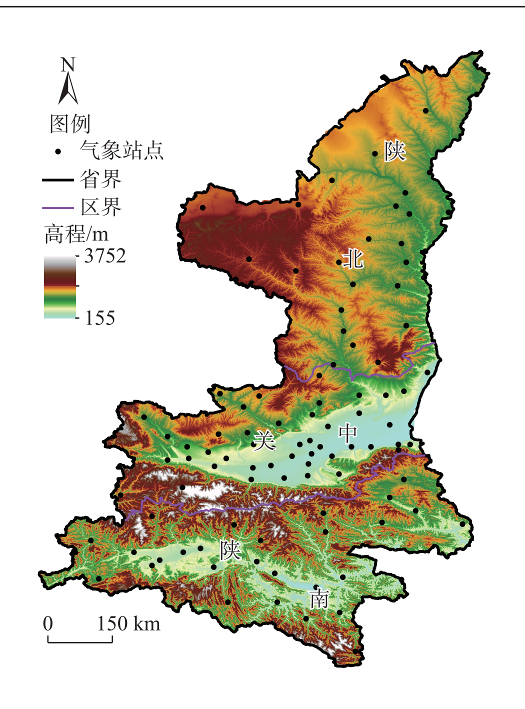
1 资料与方法

1.1 研究区概况

陕西省(105°29′~111°15′E,31°42′~39°35′N)地处中国内陆腹地,南北狭长,秦岭山脉横贯其中部,北部为黄土高原区,南部为秦巴山地,中部为关中平原,总面积为205624.3 km²。境内有渭河、汉江、嘉陵江纵横交错。在气候上,跨越中温带、暖温带和北亚热带,属季风影响边缘地带,降水量年际变率大,年内时空分配不均,洪涝和干旱灾害频繁。研究区的地形高度和气象站点分布如图1所示。

1.2 资料及来源

本文所用降水资料为陕西省95个国家级地面气象观测站(陕北24个、关中43个、陕南28个)小时降水量,来源于中国气象局国家气象信息中心提供的中国国家级地面气象站逐小时降水数据集(V2.0)。使用前对降水资料界值、时间、空间等一致性进行检查,同时,为确保数据不受异常值的影响,利用人工观测的日降水量对逐小时降水量进行校对。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1 研究区气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the study area

1.3 不同历时强降水的定义及统计方法

根据中央气象台的业务规定,结合陕西省天气气候特点及相关文献[17],本文采用固定阈值法定义4个不同历时的强降水事件。当1 h降水量≥20 mm、3 h降水量≥30 mm、6 h降水量≥50 mm或12 h降水量≥50 mm时,定义该站该历时发生了强降水事件。1 h降水量为实际观测雨量,3 h、6 h、12 h的降水量为每个时次前时段雨量的累加值。

不同历时强降水频次统计时,若某站某历时降水量大于该历时强降水阈值,则认为该站该历时出现1次强降水事件,若连续2次强降水事件间隔小于该“历时”的时长,则计为1次强降水事件,即连续的2次强降水事件之间不会有重叠。如,某日20:00、21:00、22:00、23:00的3 h降水量均大于30 mm,则计20:00和23:00各出现1次该历时强降水事件,以此类推。

在某一特定时段内,以各站发生强降水事件频次之和作为区域强降水频次指标。用逐月发生强降水次数占总频次的比率(%)分析强降水的月变化。采用线性倾向估计方法[23]分析强降水指标的长期变化趋势。

2　结果与分析

2.1　不同历时强降水极值分布

陕西省95个测站5—9月不同历时降水极值的空间分布如图2所示。总体上，陕北北部长城沿线风沙区4个历时的降水极大值均较低，高极大值区基本呈散点状分布。陕西省各地1 h历时降水极值空间差异很大，在34.2 mm（太白站）~124.5 mm（华州站）之间，大部分地区的小时雨量极值为50~70 mm，华州、镇巴和武功3站超过100 mm。1 h降水极值≥70 mm的站点呈散点状，主要分布在陕南秦巴山区、关中平原中部和渭北西部及陕北中南部（图2a）；各地3 h历时降水极值在53.8 mm（定边站）~151.7 mm（华阴站）之间，大部分地区3 h极值为70~100 mm，3 h降水极值≥100 mm站点呈点-线状分布，从最南端的镇巴县到陕北的佳县以及东西向沿渭河干流分布（图2b）；各地6 h历时降水极值在67.3 mm（定边站）~187.7 mm（子长站）之间，大部分地区6 h极值为90~130 mm，6 h降水极值≥130 mm的站点自南向北呈点-面状分布，陕北东北部是全省6 h降水极大值的高值区（图2c）；各地12 h历时降水极值在73.0 mm（三原站）~217.2 mm（佳县站）之间，大部分地区降水极值为100~160 mm，12 h降水极值≥160 mm的区域呈散点状，主要分布在关中西部、陕南西部及陕北东北部（图2d）。

由以上分析可见，陕西省不同历时强降水极值的空间差异较大，历时越短，降水量极值分布的局地性越强。高极值区存在3个区域，分别是陕南南部、关中中部和陕北中北部。这主要由于陕西省受

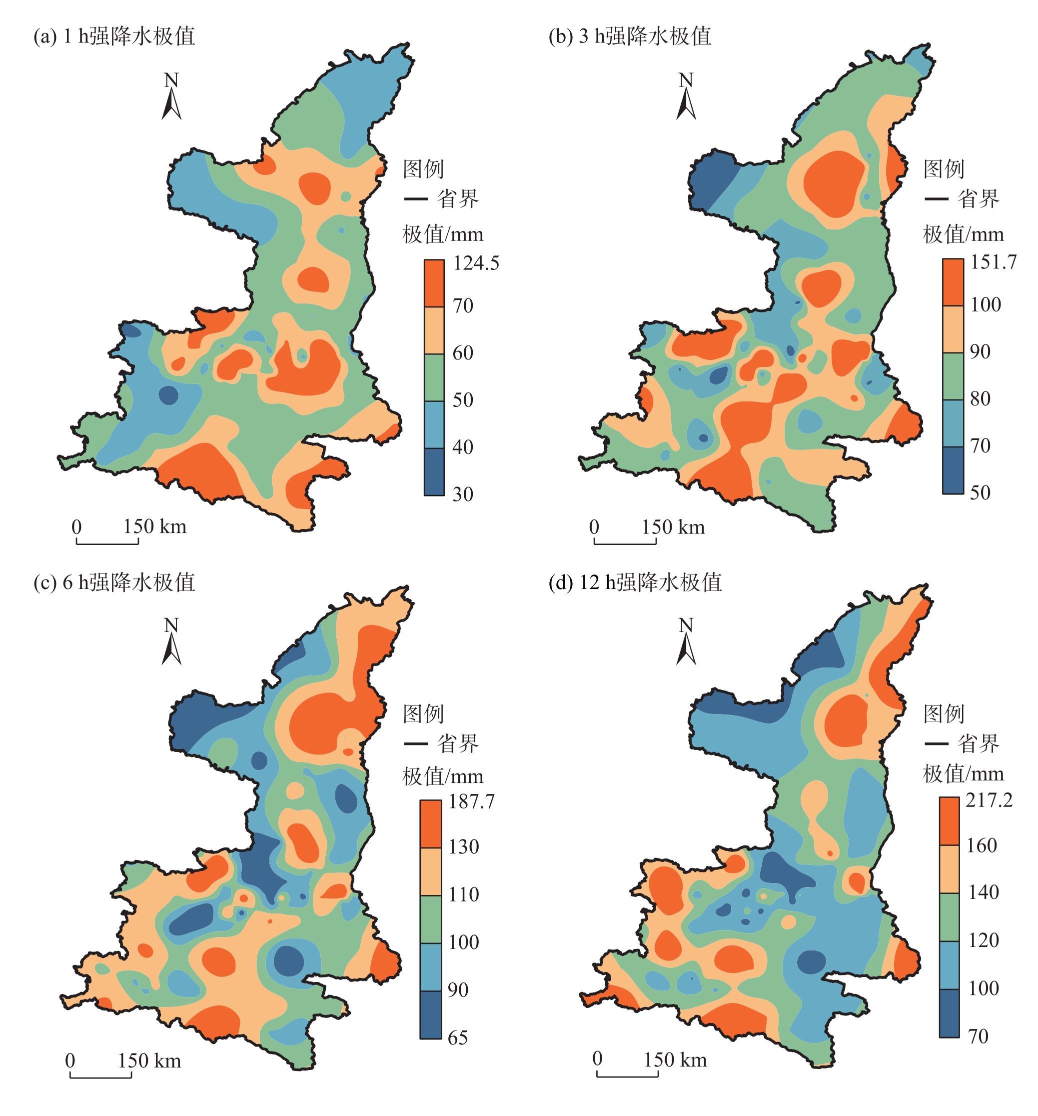


图2　1981—2020年不同历时强降水极值分布

Fig. 2　Extreme value distributions of heavy rainfall with different durations from 1981 to 2020

西南季风、西太平洋副热带高压的进退及高原涡东移影响，加之秦岭、黄土高原地形波作用导致短时强降水极值较大，而关中平原出现1 h和3 h极端强降水，与关中平原自西向东的喇叭口地形的狭管效应有关[20]。值得关注的是，不同历时降水极值在陕北中东部均较大，表明该区域暖季降水强度大，局地性强，突发性的强降水防范不可忽视。

2.2 不同历时强降水频次分布

1981—2020年陕西省5—9月不同历时强降水出现频次空间分布如图3所示。1 h历时强降水在陕北西北部风沙区和关中平原中西部较少，在宝鸡站、兴平站、定边站最少，仅20次(年均0.5次)，在陕南大部50次(年均1.3次)以上，在商南站最多，达127次(年均3.2次)(图3a)。3 h历时强降水在陕北西北部和关中平原中部较少(图3b)，仅30次(年均0.8次)左右，在陕南东部和南部50次(年均1.3次)以上，在镇巴站最多，达174次(年均4.3次)。6 h历时强降水相对较少(图3c)，全省大部在20次以下，平均2 a出现1次，仅在陕南南部出现40次(年均1次)以上，在镇巴站最多，达96次(年均2.4次)。12 h历时强降水在陕北西北部和关中中部较少(图3d)，在20次(年均0.5次)左右，在巴山山区达60次(年均1.5次)以上，在镇巴站最多，达184次(年均4.6次)。

总体上，12 h内不同历时强降水出现频次的空间分布较为相似，均表现为南多北少、东多西少的特点。由于秦岭的自然屏障阻挡了南方暖湿气流的北上，秦岭以北的降水明显少于南部，独特的地理位置和地形抬升等因素影响，陕西省强降水发生频次南北差异巨大[14]，不同历时强降水发生的局地性也较突出，强降水多发区明显集中在陕南秦巴山

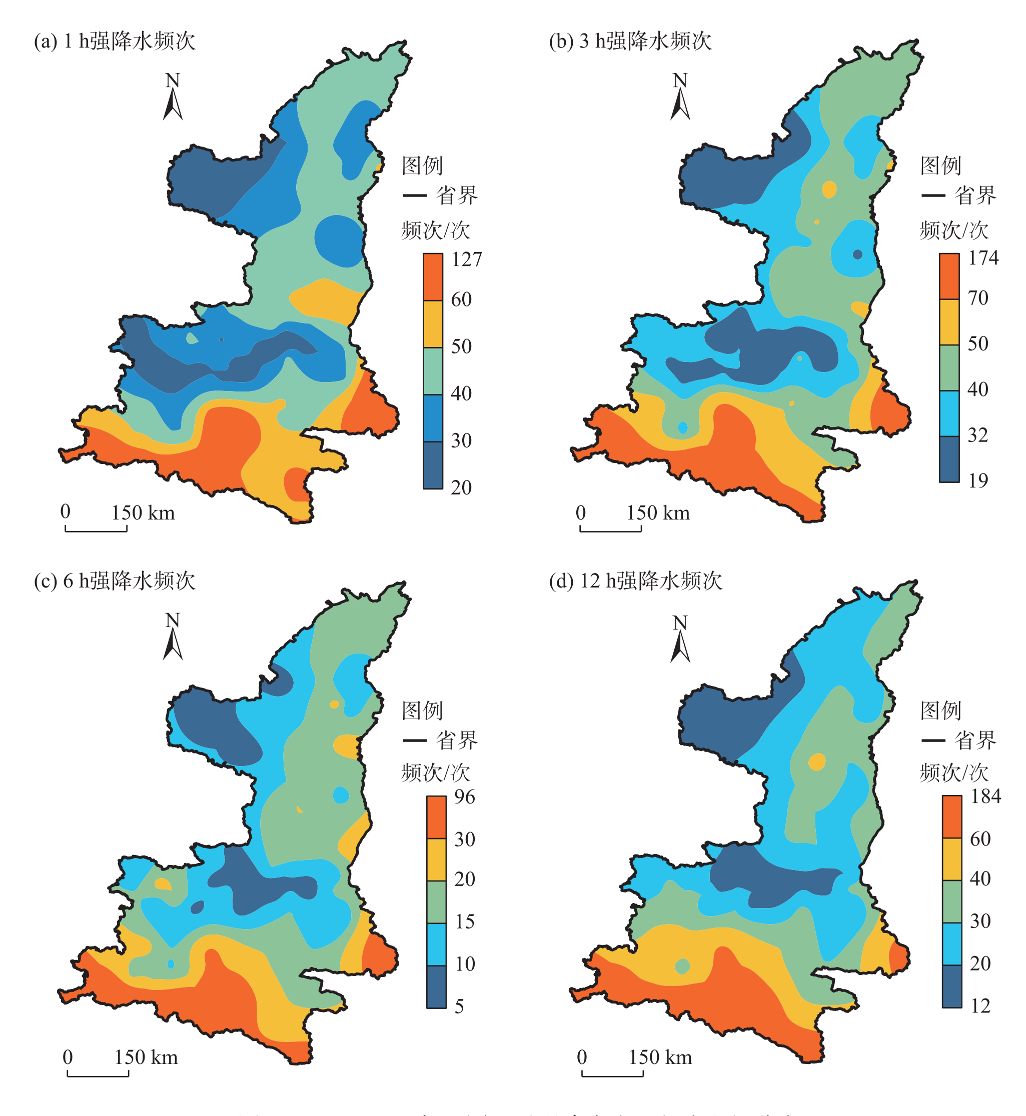


图3 1981—2020年不同历时强降水出现频次空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of the frequency of heavy rainfall with different durations from 1981 to 2020

区，包括商洛市的商南县，安康的紫阳县、石泉县、镇坪县、宁陕县，汉中市的镇巴县、宁强县、佛坪县、西乡县。

2.3 不同历时强降水的月和日变化

2.3.1 强降水的月变化 以1981—2020年陕西省各月发生强降水次数占总次数的百分比来分析强降水的月变化。5—9月3 h降水量≥30 mm的强降水事件出现最多，年均107站次，6 h降水量≥50 mm的强降水出现最少，年均43站次，其次为1 h和12 h的强降水事件，年均分别为94站次和85站次。从不同历时强降水频率的月变化(图4)可见，不同历时强降水均集中发生在7—8月，占汛期(5—9月)的71%~87%，其次为6月和9月，占比不足10%，5月最少。这与牛若芸等[24]统计的华北区域性暴雨频次的年内变化一致，可见华北暴雨与短时强降水的时间分布特征具有一致性。这主要由于7月中旬前后西太平洋副热带高压完成第二次北跳，脊线平均位于25°~30°N，陕西省正好位于副高外围5840~5880 gpm之间，低空急流强盛，将西太平洋和孟加拉湾的水汽源源不断地向内陆输送，配合西风槽或高原短波槽活动，常常在陕西省引发降水，不但强度强，而且具有一定的持续性[22]。

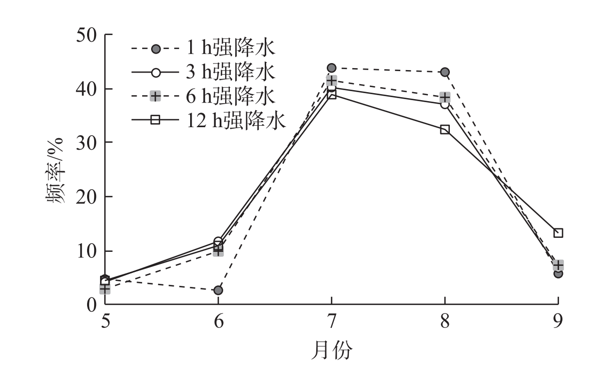


图4 1981—2020年不同历时强降水频率月变化

Fig. 4 Monthly variations of the frequency of heavy rainfall with different durations from 1981 to 2020

不同历时强降水出现频率在各月的分布形态略有不同，6月1 h的强降水频率明显偏低，8月1 h强降水频率和9月12 h强降水频率明显偏高，表明9月降水以对流性和混合型降水为主，降水具有一定的持续性。

2.3.2 强降水的日变化 陕西省南北跨越北亚热带、暖温带和温带3个气候带，降水日变化南北差异明显[22]。因此，分区考察陕西省各气候区不同历时强降水的日变化。由不同历时强降水频率的日变化(图5)可见，1 h强降水的日变化最为明显，6 h次之，12 h日变化最小。1 h强降水各区均在午后至傍晚前后出现峰值，陕北日变化最为明显，为单峰型，峰值出现在17:00(图5a)。关中和陕南为双峰型，主峰均出现在21:00，次峰出现在07:00—08:00。傍晚

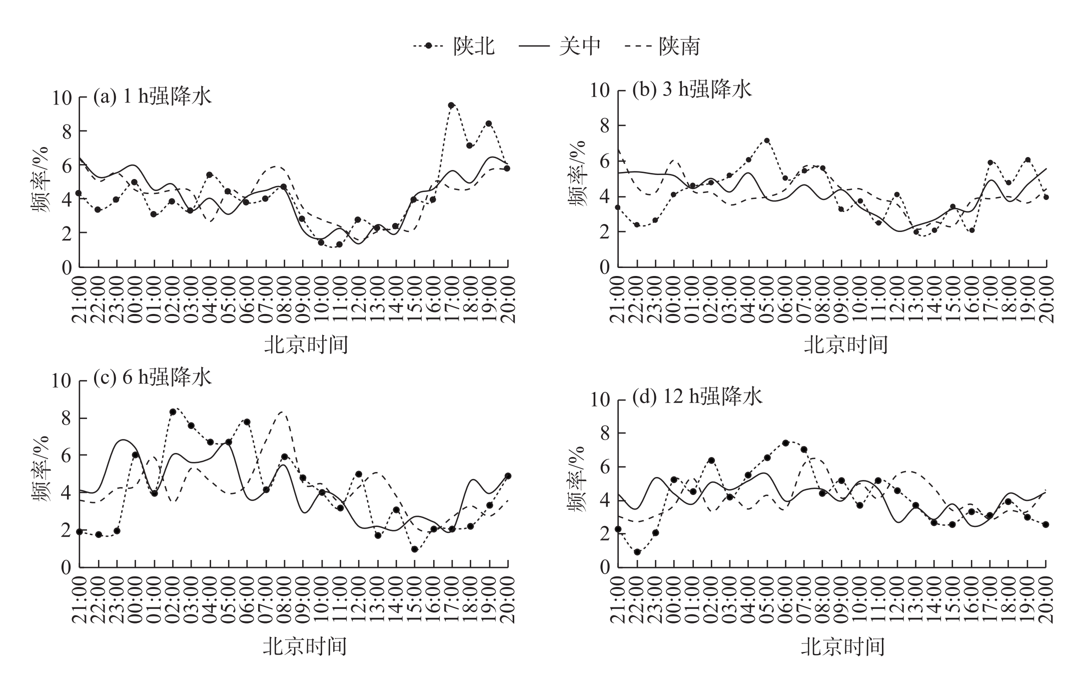


图5 各区域不同历时强降水频率日变化

Fig. 5 Daily variations of the frequency of heavy rainfall with different durations in each region

前后1 h强降水频发主要是由于午后强对流所致[14]；3 h强降水陕北和陕南日变化明显，为双峰型（图5b），其中陕北主峰出现在05:00，次峰出现在19:00；陕南主峰出现在21:00，次峰出现在07:00。关中日变化平缓，仅在正午前后出现低谷；6 h强降水日变化总体上呈单峰型分布，夜间明显多于白昼（图5c）。12 h强降水日变化仅陕北峰谷明显，关中和陕南较平缓（图5d）。不同历时强降水日变化存在着区域性差异，历时越短，日变化越明显，特别是陕北短历时强降水日变化最为突出，峰值出现在傍晚或凌晨以后。

2.4 不同历时强降水极值的趋势变化

2.4.1 强降水极值的趋势变化 从全省95个气象站不同历时强降水年极值中分别挑选最大值作为陕西省各历时强降水的极值。陕西省1 h历时强降水极值的年际波动大，近40 a的趋势变化不明显，但具阶段性变化特征，20世纪90年代中期至21世纪初极值较大（图6a）；3 h历时强降水近40 a在波动中呈明显增强趋势，增速为5.8 mm·(10a)$^{-1}$，通过了0.05显著性检验（图6b）；6 h和12 h强降水也呈增强趋势，增速分别为4.2 mm·(10a)$^{-1}$和3.8 mm·(10a)$^{-1}$，未通过显著性检验（图6c~d）。总体上看，陕西省不同历时强降水极值的年际变化大，均呈增强趋势，其中3 h历时的强降水增强最为显著。各地不同历时强降水极值的趋势变化（图略）表现为非均一性，全省大部分地方强降水极值表现为增强趋势，减弱区域的范围较小，并呈分散性分布。

2.4.2 强降水频次的趋势变化 陕西省暖季不同历时强降水站次均呈增多趋势，2009—2018年为各历时强降水多发时段（图7）。近40 a陕西省3 h强降水年站次增速最大，为10.2站次·(10a)$^{-1}$，其次为1 h和6 h次之，均通过了0.05显著性检验，12 h强降水也在增多，但未通过显著性检验。从不同月份看（表1），5月各历时强降水站次均呈减少趋势，但不明显；6月和7月各历时强降水均呈增多趋势，特别是7月1 h、3 h和6 h均呈显著增加趋势；8月12 h历时和9月1 h历时强降水略有减少，其他历时均呈增多趋势。

陕西省各地暖季不同历时强降水年频次的变化趋势呈非均一性特征，大多数站点强降水呈增多趋势，历时越短，呈增多趋势的站点越多（图8）。1 h强降水增多区域主要分布在榆林市、咸阳市、渭南市、商洛市和安康市，显著增多的地区增速在0.3次·(10a)$^{-1}$以上，减少趋势主要分布在延安南部、关中中部和陕南西部（图8a）；3 h强降水的增多区域主要分布在陕北、关中西部和陕南，显著增多的地区增速也在0.3次·(10a)$^{-1}$以上，减少趋势主要分布在陕北南部和关中中东部（图8b）；6 h强降水的增加主要在陕北的吴堡县、志丹县、米脂县、清涧县和陕南的佛坪县、南郑县（图8c）；12 h强降水的增多主要

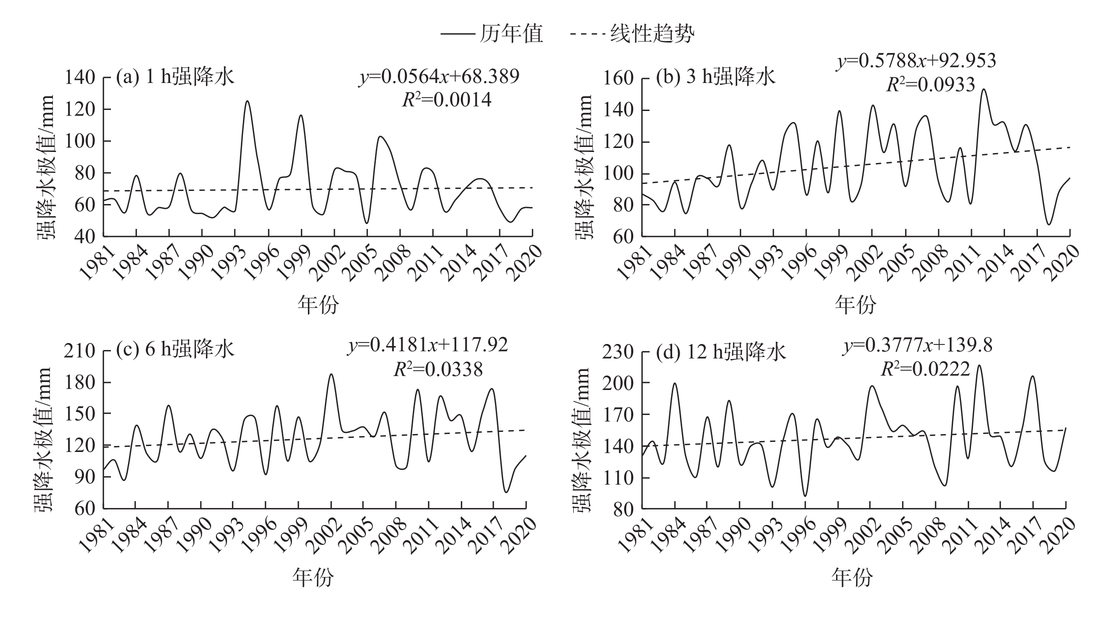


图6　1981—2020年不同历时强降水极值的年际变化

Fig. 6　Annual variations of the extreme values of heavy rainfall with different durations from 1981 to 2020

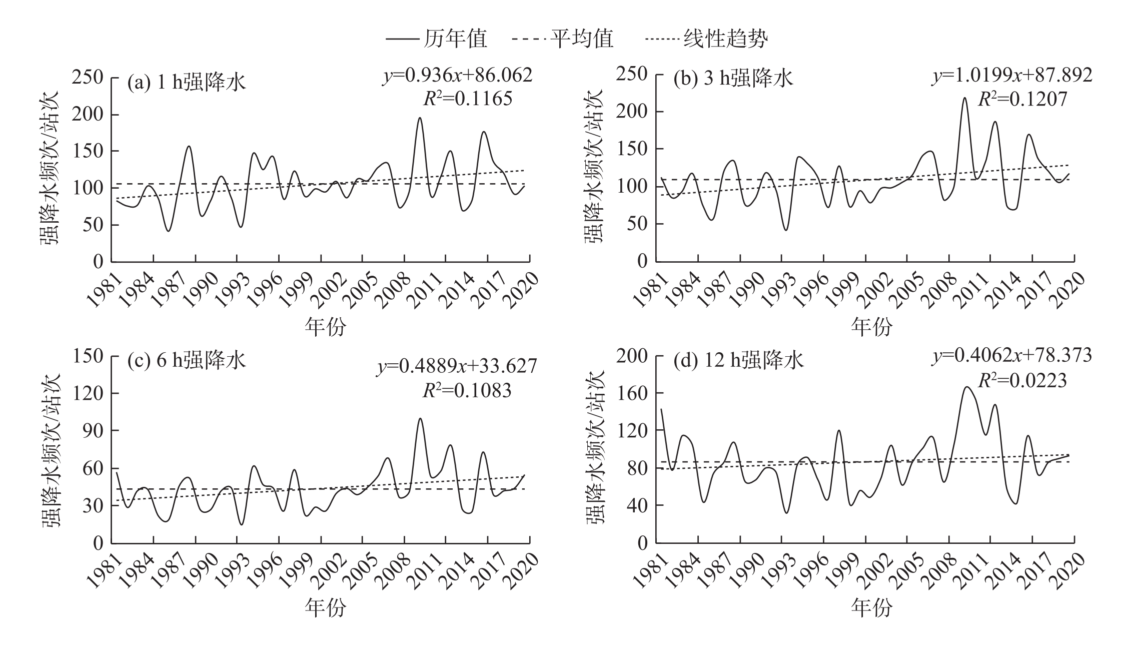


图7 1981—2020年不同历时强降水频次的逐年变化

Fig. 7 Annual variations of heavy rainfall frequency with different durations from 1981 to 2020

表1 1981—2020年各月不同历时强降水出现频次的线性变化趋势系数

Tab. 1 Linear trend coefficient of heavy precipitation frequency with different durations from 1981 to 2020

历时/h	5—9月	5月	6月	7月	8月	9月
1	0.936*	−0.136	0.225	0.626**	0.254	−0.049
3	1.020*	−0.129	0.239	0.651**	0.253	0.009
6	0.489*	−0.017	0.089	0.288*	0.123	0.010
12	0.406	−0.062	0.183	0.236	−0.016	0.072

注：*、**分别表示通过0.05、0.01显著性水平检验。

在陕北和陕南中东部（图8d），显著增多的区域增加趋势在0.2次·(10a)$^{-1}$以上，陕北南部和关中大部以及陕南西部呈减少趋势。总的来看，陕北黄河沿线和陕南中南部地区不同历时强降水均呈增多趋势，陕北南部和关中平原中部各历时强降水均呈减少趋势。1 h与3 h强降水的趋势变化特征在空间上较为相似，6 h与12 h较为相似。

3 讨论

强降水极易引发山洪、泥石流、城市内涝等严重灾害。随着全球变暖加剧，强降水更倾向于在短时间尺度产生[3-4]。本文将12 h内强降水事件按历时进行划分，分析不同短历时强降水的时空变化。总体上，陕西省不同短历时强降水呈现北少南多的特征，这与陕西省暴雨分布基本一致，也与陈炯等[10]研究的中国短时强降水时次频率地理分布结果相一致。不同历时降水往往具有不同的时空分布和变化规律，厘清不同短历时强降水的时空差异，可为强降水的预报预警和制定精细的灾害防御措施提供参考。史维良等[25]研究认为陕西省大多数地区发生小概率、高危险性的极端降水可能性在增大，极端降水综合危险性整体从陕南至陕北呈南高北低分布。但值得关注的是，在陕北强降水频次少的一些区域降水强度很大，小时降水强度超过50 mm·h^{-1}，还分布着全省不同短历时强降水的极值，这表明陕北暖季短时降水强度比陕南更大，加之极端强降水发生的年际变化很大，很容易被忽视。因此，在防范综合危险性高的秦巴山区极端降水的同时，也要高度关注陕北局地短时强降水可能引发的洪涝或塌方、滑坡泥石流等灾害。另一方面，强降水易发生在夜间，增加了抗灾救灾的难度，应加强夜间防灾意识。研究未能充分考虑秦岭和黄土高原复杂地形对短时强降水的影响，后续工作

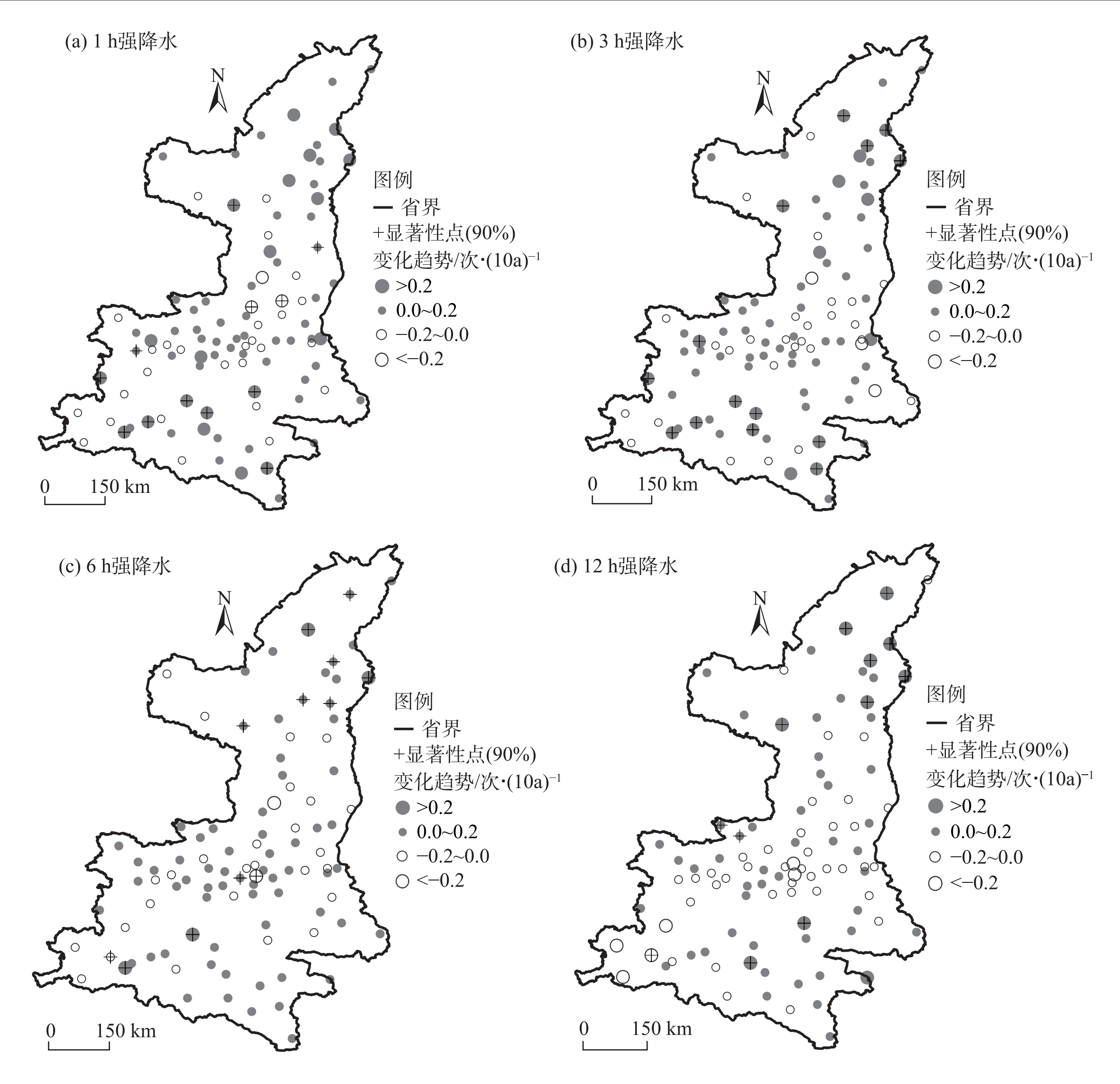


图8 1981—2020年不同历时强降水年频次变化趋势空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of the annual frequency variation trend of heavy rainfall with different durations from 1981 to 2020

将增加密集的区域(乡镇级)自动站资料,并引入多源融合高精度网格实况,对秦岭和黄土高原复杂地形区域开展精细化极端强降水分析和致灾临界阈值的研究,为区域制定强降水积水、内涝灾害防御提供科学依据。

4 结论

(1) 陕西省各地不同历时强降水极值空间差异大,分别为34.2~124.5 mm、53.8~151.7 mm、67.3~187.7 mm、73.0~217.2 mm。不同历时强降水极值的高值区基本呈散点状分布于陕南南部、关中中部和陕北沿黄一线。历时越短,极值分布的局地性越强。

(2) 陕西省各地强降水频次空间分异特征明显,基本呈现"南多北少、东多西少"的特点,受纬度、地形和水汽输送等因素影响,各历时强降水多发区明显集中在秦巴山区,而关中平原中部和陕北长城沿线为强降水稀发区。

(3) 陕西省不同历时强降水集中发生在7—8月,占汛期(5—9月)的70%~85%。强降水日变化存在着南北区域性差异,历时越短,日变化越明显,特别是陕北短历时强降水日变化最为突出,峰值出现在傍晚或后半夜。

(4) 整体上,陕西省各历时强降水近40 a呈增多增强趋势,尤以3 h强降水的增加最为显著。各历时强降水的趋势变化在空间上表现为非均一性,陕北北部和陕南中东部强降水呈增多趋势,而在陕北南部和关中中部呈减少趋势,且历时越短,强降

水呈增多趋势的范围越大。

参考文献(References)

[1] 苏爱芳, 吕晓娜, 崔丽曼, 等. 郑州"7.20"极端暴雨天气的基本观测分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(5): 445-454. [Su Aifang, Lü Xiaona, Cui Liman, et al. The basic observational analysis of "7.20" extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Torrential Rain and Disasters, 2021, 40(5): 445-454.]

[2] 赵洋洋, 张庆红, 杜宇, 等. 北京"7.21"特大暴雨环流形势极端性客观分析[J]. 气象学报, 2013, 71(5): 817-824. [Zhao Yangyang, Zhang Qinghong, Du yu, et al. Objective analysis of the extreme of circulation patterns during the 21 July 2012 torrential rain event in Beijing[J]. Acta Meteorological Sinica, 2013, 71(5): 817-824.]

[3] 周波涛, 钱进. IPCC AR6报告解读:极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718. [Zhou Botao, Qian Jin. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6 [J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718.]

[4] Berg P, Haerter J O. Unexpected increase in precipitation intensity with temperature: A result of mixing of precipitation types?[J]. Atmospheric Research, 2013, 119: 56-61.

[5] 俞小鼎, 郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 391-418. [Yu Xiaoding, Zheng Yongguang. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 391-418.]

[6] 江帆, 王东海, 曾智琳. 近20年季风爆发前后珠江三角洲前汛期短时强降水的时空演变特征与成因[J]. 大气科学, 2024, 48(2): 715-734. [Jiang Fan, Wang Donghai, Zeng Zhilin. Spatiotemporal evolution characteristics and causes of short-duration heavy rainfall in the presummer rainy season over the Pearl River Delta region before and after the South China Sea summer monsoon onset in the past 20 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, 48(2): 715-734.]

[7] 宇如聪, 李建. 中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析[J]. 气象学报, 2016, 74(1): 18-30. [Yu Ruchong, Li Jian. Regional characteristics of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2016, 74(1): 18-30.]

[8] 周子涵, 王基鑫, 刘维成, 等. 甘肃省暖季降水日变化特征[J]. 干旱区研究, 2024, 41(1): 1-12. [Zhou Zihan, Wang Jixin, Liu Weicheng, et al. Diurnal variation characteristics of warm season precipitation in Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(1): 1-12.]

[9] 胡迪, 李跃清. 青藏高原东侧四川地区夜雨时空变化特征[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 161-179. [Hu Di, Li Yueqing. Spatial and temporal variations of nocturnal precipitation in Sichuan over the eastern Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(1): 161-179.]

[10] 陈炯, 郑永光, 张小玲, 等. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J]. 气象学报, 2013, 71(3): 367-382. [Chen Jiong, Zheng Yongguang, Zhang Xiaoling, et al. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season [J]. Acta Meteorological Sinica, 2013, 71(3): 367-382.]

[11] 王婧羽, 李哲, 汪小康, 等. 河南省雨季短时强降水时空分布特征[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(2): 152-160. [Wang Jingyu, Li Zhe, Wang Xiaokang, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of flash heavy rain in Henan during rainy season[J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(2): 152-160.]

[12] 冉津江, 齐玉磊, 龙治平, 等. 基于高密度站点的四川盆地短时强降水特征分析[J]. 高原气象, 2023, 42(4): 949-961. [Ran Jinjiang, Qi Yulei, Long Zhiping, et al. Characteristics of short-time heavy rainfall in the Sichuan Basin based on high density station observations[J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(4): 949-961.]

[13] 李强, 邓承之, 张勇, 等. 1980—2012年5—9月川渝盆地小时强降水特征研究[J]. 气象, 2017, 43(9): 1073-1083. [Li Qiang, Deng Chengzhi, Zhang Yong, et al. Study on spatio-temporal distribution characteristics of hourly heavy rainfall in Sichuan and Chongqing from May to September during 1980—2012[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(9): 1073-1083.]

[14] 张宏芳, 潘留杰, 陈昊明, 等. 秦岭及周边地区暖季降水日变化及其成因分析[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 935-946. [Zhang Hongfang, Pan Liujie, Chen Haoming, et al. Diurnal variations and causes of warm season precipitation in Qinling and surrounding areas[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(5): 935-946.]

[15] 郭凌曜, 章新平, 廖玉芳, 等. 湖南短时强降水事件气候特征[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 76-80. [Guo Lingyao, Zhang Xinping, Liao Yufang, et al. Climatic characteristics of short-duration rainstorm events in Hunan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(2): 76-80.]

[16] 白晓平, 靳双龙, 王式功, 等. 中国西北地区东部短时强降水时空分布特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 411-417. [Bai Xiaoping, Jin Shuanglong, Wang Shigong, et al. Spatio-temporal characteristics of the short-time heavy rainfall in the east of northwest China [J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2): 411-417.]

[17] 苗爱梅, 王洪霞, 武捷. 山西不同历时强降水的统计特征及趋势变化[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 796-807. [Mao Aimei, Wang Hongxia, Wu Jie. Statistical characteristics and trend change of different duration short-duration heavy rainfall in Shanxi Province [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(4): 796-807.]

[18] 王楠, 赵强, 井宇, 等. 秦岭北麓一次冷锋触发的短时强降水成因分析[J]. 高原气象, 2018, 37(5): 1277-1288. [Wang Nan, Zhao Qiang, Jing Yu, et al. Causation analysis of a short-time strong rainfall triggered by cold front at the northern piedmont of Qinling Mountains[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(5): 1277-1288.]

[19] 张雅斌, 罗慧, 赵荣, 等. 西安致灾短时暴雨中尺度与动力指数

特征[J]. 热带气象学报, 2019, 35(5): 614-628. [Zhang Yabin, Luo Hui, Zhao Rong, et al. Characteristics of mesoscale system and dynamic factor index during disastrous short-time rainstorms at Xi'an[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2019, 35(5): 614-628.]

[20] 赵强, 陈小婷, 王楠, 等. 副热带高压影响下陕西关中强对流发生的环境场特征及触发机制[J]. 气象, 2022, 48(1): 28-43. [Zhao Qiang, Chen Xiaoting, Wang Nan, et al. Environmental characteristics and trigger mechanism of severe convection under the influence of subtropical high in Guanzhong area of Shaanxi Province[J]. Meteorological Monthly, 2022, 48(1): 28-43.]

[21] 张宏芳, 潘留杰, 卢珊, 等. 近40年秦岭及周边地区极端降水变化特征[J]. 干旱区地理, 2024, 47(3): 380-390. [Zhang Hongfang, Pan Liujie, Lu Shan, et al. Variation characteristics of extreme precipitation in Qinling and surrounding areas over the past 40 years [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(3): 380-390.]

[22] 蔡新玲, 叶殿秀, 孙娴, 等. 1961—2011年陕西省汛期短时降水变化特征[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1618-1626. [Cai Xinling, Ye Dianxiu, Sun Xian, et al. Hourly precipitation variability features in Shaanxi Province in flood season during 1961—2011[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(6): 1618-1626.]

[23] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 42-45. [Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 42-45.]

[24] 牛若芸, 刘凑华, 刘为一, 等. 1981—2015年中国95°E以东区域性暴雨过程时空分布特征[J]. 气象学报, 2018, 76(2): 182-195. [Niu Ruoyun, Liu Couhua, Liu Weiyi, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of regional rainstorm processes to the east of 95°E in China during 1981—2015[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(2): 182-195.]

[25] 史维良, 车璐阳, 李涛. 陕西省汛期极端降水概率分布及综合危险性评估[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1407-1416. [Shi Weiliang, Che Luyang, Li Tao. Probability distribution and comprehensive risk assessment of extreme precipitation in flood season in Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9): 1407-1416.]

Spatial and temporal variations of heavy precipitation with different durations during warm season in Shaanxi Province from 1981 to 2020

CAI Xinling[1], CAI Yixuan[2], YE Dianxiu[3], LI Qian[1], HU Yuantao[1], HU Lin[1]

(1. Shaanxi Provincial Climate Center, Xi'an 710014, Shaanxi, China; 2. Zhouzhi County Emergency Management Bureau, Xi'an 710400, Shaanxi, China; 3. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: This study analyzes the spatiotemporal changes in four durations of heavy precipitation (1 h, 3 h, 6 h, 12 h) for warm season (May-September) in Shaanxi Province, China during 1981—2020 based on 95 national meteorological observation stations and different statistical methods. The results show that: (1) The short duration heavy precipitation in Shaanxi mainly occurs during July-August. The regions with high frequency of heavy precipitation in four durations are located in the Qinling-Daba Mountains of southern Shaanxi, and with low frequency of that occur in the central Guanzhong Plain and the region along the Great Wall of northern Shaanxi. (2) The spatial differences of precipitation extremes in each duration are large, and the shorter duration with the stronger local distribution of the extreme precipitation. (3) In the past 40 years, the intensity and frequency of the each duration of heavy precipitation are increasing and enchancing, especially for the 3 h duration. (4) The spatial trends in each duration of heavy precipitation is non-uniformity with increased trends along the Yellow River in northern Shaanxi and south-central Shaanxi and decreased that in the south of northern Shaanxi and the central of Guanzhong Plain, and mostly, the shorter duration, the larger extent of increased trends. (5) The diurnal variation of heavy precipitation represent geographical differences in southern and northern Shaanxi. The shorter durations often accompany more obvious diurnal variation, especially for the northern Shaanxi, and the heavy precipitation usually occurs in the evening or at night, which would cause more serious disasters.

Key words: short duration heavy rainfall; change trend; spatial and temporal distribution; Shaanxi Province